

文章编号: 1000-7032(2025)08-1384-14

莫尔超晶格中的转角光子学研究进展

陈果阳^{1,2}, 徐佳俊^{1,2}, 闫家旭^{1*}, 刘 雷¹, 申德振¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 特种发光科学与技术全国重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 莫尔超晶格在二维范德华异质结构中展现出丰富的物理现象,极大地拓展了转角光子学(Twistoptics)的研究领域。通过精确调控层间扭转角,莫尔超晶格可以形成独特的电子、激子及光学特性,例如能带展平、强关联态、拓扑态及手性光学响应。这些特性为新型光电器件、单光子源、激子激光器及量子计算平台的开发提供了新的可能性。本综述系统回顾了莫尔超晶格中的转角光子学,包括其制备方法、激子行为、非线性光学效应、纳米光谱表征及电场调控等方面的最新进展,并探讨了其在未来光电子学与量子技术中的应用前景。

关键词: 莫尔超晶格; 转角光子学; 莫尔激子; 非线性光学; 量子光学

中图分类号: O431.2 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250068

CSTR: 32170.14.CJL.20250068

Research Progress on Twistoptics in Moiré Superlattices

CHEN Guoyang^{1,2}, XU Jiajun^{1,2}, YAN Jiaxu^{1*}, LIU Lei¹, SHEN Dezhen¹

(1. State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: yanjiaxu@ciomp.ac.cn

Abstract: Moiré superlattices in two-dimensional van der Waals heterostructures exhibit a wealth of physical phenomena, significantly expanding the research scope of twistoptics. By precisely tuning the interlayer twist angle, Moiré superlattices can generate unique electronic, excitonic, and optical properties, such as band flattening, strong correlation states, topological states, and chiral optical responses. These characteristics open new opportunities for novel optoelectronic devices, single-photon sources, exciton lasers, and quantum computing platforms. This review systematically summarizes recent advances in twisted photonics of Moiré superlattices, covering the fabrication methods, exciton behaviors, nonlinear optical effects, nanoscale spectroscopy, and electric field tunability. The potential applications in future optoelectronics and quantum technologies are also discussed.

Key words: Moiré superlattices; twistoptics; Moiré exciton; nonlinear optics; quantum optics

1 引言

自石墨烯成功剥离以来^[1],二维材料因其独特的物理特性迅速成为凝聚态物理与纳米科技的前沿核心。例如,石墨烯的狄拉克锥能带^[2-4]、过渡金属二硫化物(TMDs)的谷选择性偏振光吸收^[5-6]以及六方氮化硼(hBN)的优异绝缘性^[7-10],为光子

学、电子学及能源催化等领域提供了新平台。然而,单一二维材料的固有性能瓶颈促使研究者探索异质结构设计策略:通过范德瓦尔斯堆叠或层间扭转构建莫尔超晶格(图1(a)),突破单层极限并诱导出新奇量子效应。这类策略催生的“转角光子学”(Twistoptics)为光与物质相互作用研究

收稿日期: 2025-03-06; 修订日期: 2025-03-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(12334014); 国家重大科研仪器研制项目(11727902); 中国科学院海外高层次人才项目 Supported by National Natural Science Foundation of China (12334014); National Major Scientific Instruments and Equipments Development Project(11727902); Overseas High-level Talents Program of Chinese Academy of Sciences

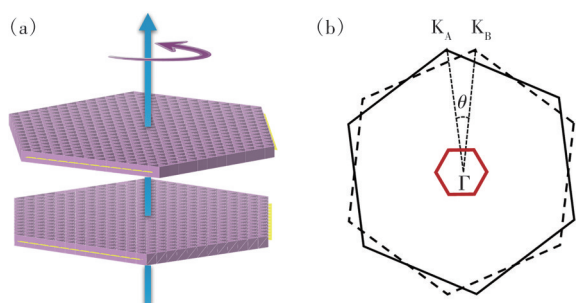


图1 二维转角莫尔体系示意图。(a)上下两层材料绕垂直轴相对旋转形成扭转角 θ 的几何结构;(b)莫尔超晶格的第一布里渊区,其中两层材料的K点扭转 θ

Fig.1 Schematic of a twisted Moiré system in two-dimensional materials. (a) Illustration of the geometric structure formed by rotating the top and bottom layers relative to each other with a twist angle θ around the vertical axis. (b) Corresponding first Brillouin zones showing the twist angle θ of K-points between the two layers

开辟了新维度。

莫尔超晶格的周期特性由双层材料的扭转角(θ)与晶格常数(a)共同决定,其周期长度可表述为 $L = a/(2 \sin(\theta/2))$ (当晶格匹配时)。该公式源于两层六方晶格相对旋转 θ 角后形成的几何干涉:当 θ 较小时,莫尔周期显著增大(如 $\theta \approx 1^\circ$ 时, $L \approx 5 \text{ nm}$),形成长程周期势场。莫尔势的傅里叶分量 $V_m \propto e^{-(L/a)^2}$ 随 L 增大而增强,导致电子-空穴有效质量重整化($m^* \propto (a/L)^2$)。当 L 超过激子玻尔半径时,莫尔势会显著局域化激子波函数,通过量子限域效应使激子能级分裂(如峰间距 $\Delta E \approx \hbar^2/(2m^*L^2)$)。此外,转角调控会诱导能带折叠效应(如图1(b)):当 θ 接近魔角(如 $\theta \approx 1.1^\circ$)时,布里渊区边界折叠导致费米速度重正化,形成准平带结构(带宽 $\Delta \approx 10 \text{ meV}$)。而平带中增强的态密度($\text{DOS} \propto 1/\Delta$)将显著提升激子束缚能($E_b \propto e^4 m^*/(\epsilon^2 \hbar^2)$),并通过空间局域化产生离散激子态。

实验上,转角双层石墨烯(TBG)中($\sim 1.1^\circ$),层间隧穿与狄拉克锥分离的协同作用导致平带形成^[11-12]。类似的平带效应也在转角TMDs(如 MoS_2 和 WSe_2)中得到验证^[13-17]。在光子学领域,莫尔超晶格通过扭转角度依赖的光-物质耦合机制,为光场调控提供了新范式。例如,转角TMDs异质结中的非线性光学响应、等离激元及激子手性均可通过角度精准调控^[18-20]。尤为重要的是,局域化激

子形成的“莫尔激子”为单光子发射器及量子光源设计奠定了基础^[21]。此外,强关联电子态与拓扑性质的耦合进一步拓展了莫尔体系的光电功能,例如基于谷自旋选择性的光电子器件及宽光谱光电探测^[22-24]。

本文系统综述了莫尔超晶格中转角光子学与光电特性的研究进展,重点关注TMDs异质结的最新制备策略、激子物理机制及器件应用。首先介绍莫尔超晶格的精准制备与多尺度表征技术;其次探讨其转角光子学特性(包括非线性光学、转角声子、磁光效应及手性光学);接着展示基于莫尔超晶格的新型光学器件(如量子光源与谷光子芯片);最后展望了该领域存在的挑战与机遇。

2 莫尔超晶格的制备与原位调控技术

转角是莫尔超晶格层间耦合与能带调制的核心参数,其精准控制是转角光子学发展的关键挑战。本章系统评述主流制备技术的原理与进展,涵盖干/湿法转移、化学气相沉积(CVD)直接生长、成核重构及原位动态调控策略,聚焦石墨烯与 MoS_2 两类典型体系,分析其技术瓶颈与优化路径。

2.1 干/湿法转移技术

干/湿法转移是二维异质结构制备的传统策略,其通过机械剥离或溶液辅助堆叠实现角度可控的层间耦合。近年来,单晶外延技术的突破进一步提升了转移精度与界面质量。Kim等^[25]通过半球形基底辅助的逐层拾取技术,首次实现转角精度 $<1^\circ$ 的双层石墨烯制备(图2(a))。其核心在于:将单层石墨烯分割后,利用半球基底旋转(精度达 0.1°)精准堆叠同源晶粒,确保晶轴对齐与转角均匀性,hBN封装与顶栅集成进一步抑制界面污染,为魔角石墨烯器件的量子输运研究奠定基础。Liao等^[26]开发了外延生长辅助的湿法转移策略,实现厘米级 MoS_2 同质结的转角控制(图2(b))。该技术通过CVD生长取向一致的单层 MoS_2 ($0^\circ/60^\circ$ 孪晶),结合水辅助PDMS转移与线性划片对准,实现 $0^\circ \sim 30^\circ$ 转角堆叠。其界面清洁度显著优于传统湿法转移,为大规模转角器件制备提供了新途径。综上,干/湿法转移技术凭借成熟的操控工艺和较高的角度精度,已广泛应用于小

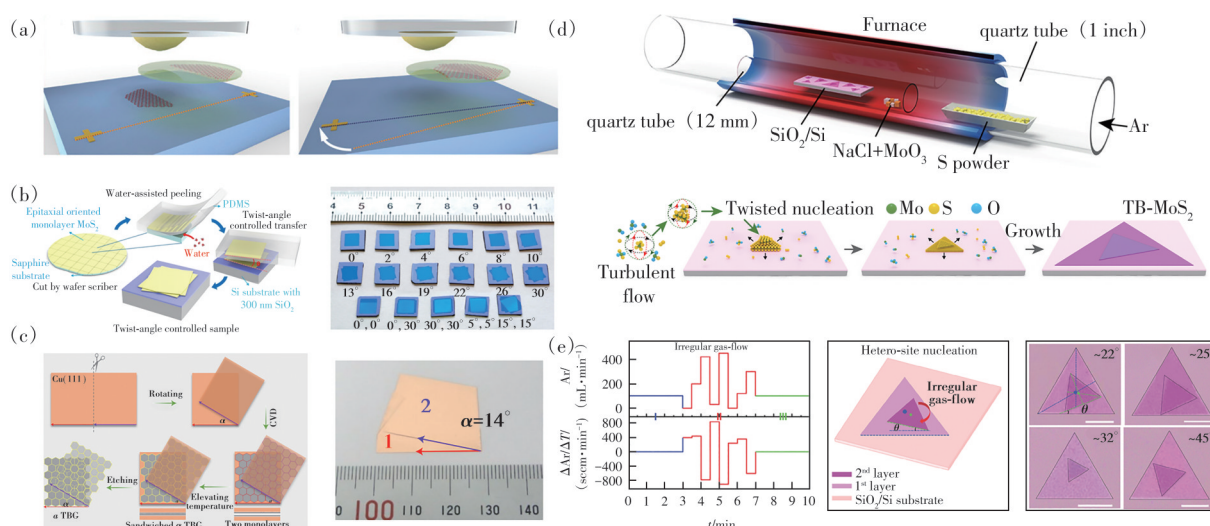


图2 莫尔超晶格的制备技术。(a)干法转移技术分步拾取与旋转堆叠制备小转角双层石墨烯^[25];(b)湿法转移辅助的厘米级MoS₂同质结构精确转角堆叠(0°~30°)制备^[26];(c)基于预旋转Cu(111)基底角度复刻策略的CVD法生长任意转角双层石墨烯^[27];(d)湍流诱导的成核重构策略实现宽范围转角MoS₂生长^[28];(e)气体流速扰动调控的同点位成核生长具有公度转角的MoS₂双层^[29]

Fig.2 Fabrication techniques for the Moiré superlattice. (a) Dry transfer technique for small-angle twisted bilayer graphene *via* stepwise pick-up and rotational stacking^[25]. (b) Wet transfer-assisted centimeter-scale MoS₂ homostructure with precise angle stacking (0°~30°)^[26]. (c) CVD growth of arbitrary-angle bilayer graphene based on pre-rotated Cu(111) substrate angle replication strategy^[27]. (d) Turbulence-induced nucleation reconstruction strategy for wide-range twisted MoS₂ growth^[28]. (e) Gas flow rate perturbation-controlled homo-site nucleation growth of commensurate-angle MoS₂ bilayers^[29]

尺寸转角异质结构的构建。然而,其制备过程仍面临样品尺寸有限、工艺耗时及界面残留等问题,限制了高通量制备与器件集成化的发展。未来可结合外延生长与自动化转移策略,实现大面积、高洁净度的可控转角制备。

2.2 CVD直接生长技术

CVD技术通过原位生长转角结构规避转移污染,其核心在于反应基元(前驱体、气流场、成核位点)的动态调控,实现转角范围与公度角的选择性合成。Liu等^[27]基于单晶Cu(111)基底,通过预旋转分割与CVD参数协同调控,实现任意转角双层石墨烯的原位生长(图2(c))。Cu箔预旋转精度<1.0°,结合等电位面刻蚀剥离技术,确保莫尔条纹均匀性与器件兼容性。Xu团队^[28]提出成核重构策略,通过湍流气流诱导MoS₂异位成核,实现0°~45°宽范围转角调控(图2(d))。同期,Zhou等^[29]开发了同位点成核技术,通过精确控制S/Mo蒸发速率与基底温度,实现公度转角(22°/25°/32°/45°)MoS₂双层的定向生长(图2(e))。

CVD直接生长技术为构建大尺寸、可重复的转角莫尔结构提供了可扩展路径。当前研究已实现从0°到45°的宽范围角度控制,但仍需突破异

质材料间角度调控精度与界面洁净度的双重瓶颈。发展多源协同气氛调控与图案化诱导成核策略将是提升转角CVD生长可控性的关键方向。

2.3 原位动态调控技术

传统静态异质结的不可逆性限制了转角物性研究。基于AFM的机械旋转与MEMS集成平台,分别实现了单器件动态调控与高通量可编程操作,推动转角调控从“静态制备”迈向“动态设计”。Ribeiro-Palau团队^[30]设计了hBN/石墨烯/hBN三明治结构,通过AFM探针机械驱动顶部h-BN层旋转,实现 θ 连续调节,首次揭示了转角依赖量子霍尔效应的动态演化(图3(a))。最近,Tang团队^[31]开发了基于MEMS的片上多自由度调控平台(图3(b)),通过静电驱动实现二维材料间距、转角与压力的原位协同控制,将转角调控推进至器件级集成与光量子应用阶段。

原位动态调控技术通过AFM与MEMS平台引入可编程转角调节能力,为研究转角依赖物性演化及开发可调光子器件提供了新工具。尽管目前仍面临结构复杂、成本较高的问题,其高自由度与片上集成潜力将在未来转角光子学与量子器件领域发挥重要作用。

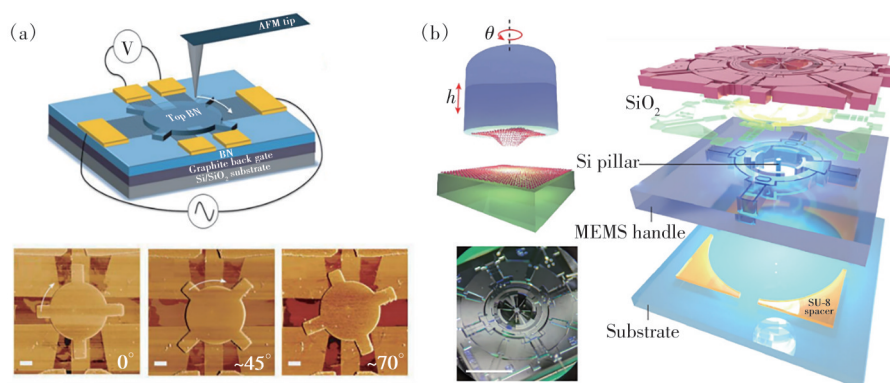


图3 莫尔超晶格转角原位调控技术。(a)基于AFM机械旋转的转角动态调控技术^[30]; (b)基于MEMS的片上多自由度调控平台^[31]

Fig.3 *In situ* angle control techniques for the Moiré superlattice. (a) AFM-based dynamic rotational control of twist angle^[30]. (b) MEMS-based on-chip platform for multi-degree-of-freedom control^[31]

3 莫尔超晶格中的激子物理

随着各类转角可控的二维异质结构制备技术不断成熟,研究者得以在实验上系统探索莫尔势场对激子物性的调控效应。尤其是在干/湿法转移与CVD直接生长等方法中,转角 θ 的精度控制已达到亚度量级,使得不同莫尔周期($L = a/(2 \sin(\theta/2))$)下的激子行为成为可调参数。因此,理解和调控莫尔激子,必须回到其结构起源与能带重构机制,这也是本章所重点探讨的内容。

3.1 莫尔激子的形成与实验验证

当WSe₂/WS₂或MoSe₂/WSe₂等异质结以微小转角堆叠时,层间晶格失配形成空间调制的莫尔势场(图4(a))^[32]。在强耦合条件(θ 接近0°或60°)下,势深(150~250 meV)远超激子动能(~8 meV),诱导激子局域化形成离散能级。例如,在WSe₂/WS₂异质结中,低温(10 K)反射对比光谱显示,小转角样品($\theta \approx 0^\circ$)的层间激子峰分裂为三个特征峰(1.683 eV、1.739 eV、1.776 eV),而大转角样品($\theta > 3^\circ$)仅保留单峰(图4(b))^[21]。这一多峰结构揭示了莫尔超晶格中激子能带的形成与混合,反映出强烈的层间激子杂化和莫尔势诱导的激子平带结构,是扭转角调控激子能带结构的直接光谱证据。光致发光激发谱进一步表明,所有分裂峰均与层间激子发射(1.409 eV)存在能量转移关系,证实其同源特性。

3.2 莫尔势调控的光学选择规则

莫尔势的对称性通过跃迁偶极矩相位调制激子光学选择规则。以MoSe₂/WSe₂异质结为例(图4(c)),莫尔超晶格内的高对称位置的原子堆垛差

异诱导偏振选择性^[22]: A区域(Mo与W原子重合),电子-空穴波函数交叠使 σ^+ 偏振占优; B区域(Mo原子位于WSe₂六边形中心),原子位移引入相位差,导致 σ^- 偏振跃迁。实验上, $\theta \approx 60^\circ$ 的MoSe₂/WSe₂异质结中, σ^+ 激发下激子发射呈现 σ^+/σ^- 交替偏振(图4(d)),偏振度在 ± 0.2 间振荡,符合s波基态(σ^+)与p波激发态(σ^-)的角动量匹配理论^[13]。此外, $\theta \approx 2^\circ$ 时激子局域化增强(图4(e)),荧光峰线宽缩窄至~100 μeV ,表明深势阱(~250 meV)可同时保留谷选择规则并实现偏振操控,为量子光源与谷光电子器件奠定了基础^[17]。

3.3 温度和电场调控效应

莫尔激子的光学特性对温度高度敏感。低温(<30 K)下,激子被局域在莫尔势阱中,光致发光峰窄(线宽~100 μeV)且偏振度高,如图4(e)中红色与蓝色谱线强度差别所示。随着温度升高,热涨落促使激子逃逸势阱,导致峰宽展宽和强度降低。例如,WSe₂/WS₂异质结中, I ~ III 峰的强度在30 K以上显著衰减,激活能分析显示势阱深度约250 meV。此外,温度还影响激子-激子相互作用。在MoSe₂/WSe₂中,双激子形成效率在30 K达到峰值,此时浅势阱(~4 meV)的局域激子被抑制,促进自由激子的多体关联(图4(f))^[33]。

电场调控为莫尔激子提供动态调制手段。通过背栅电压改变层间电荷分布,可调节激子能级和谷极化。例如,WSe₂/WS₂异质结在正栅压下,电子填充WS₂层,导致莫尔势阱中的局域激子(I、III峰)发生Stark位移,而中间峰(II)因位于势垒区域不受显著影响(图4(g))。当电场

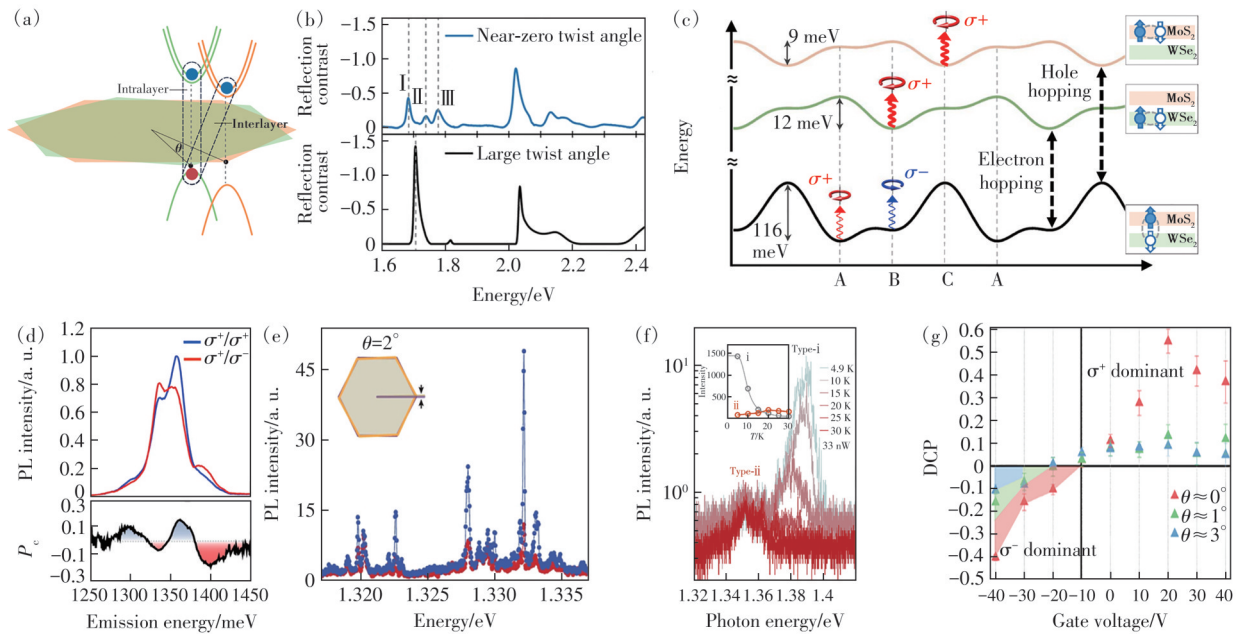


图4 莫尔激子的光学特性与调控。(a)莫尔超晶格的能带调制与层间激子形成^[32];(b)WSe₂/WS₂异质结构在不同转角下的反射光谱对比,证实莫尔激子态(I~III)的出现^[21];(c)MoS₂/WSe₂异质结构中莫尔势对激子光学选择规则的调制^[22];(d)1°的MoSe₂/WSe₂异质双层样品进行圆偏振激发后的光致发光光谱以及偏振度变化^[13];(e)2°的MoSe₂/WSe₂异质双层被莫尔势阱俘获的层间谷激子的圆偏振光致发光特性^[17];(f)被不同类型势阱俘获的莫尔激子的光学特性的温度依赖特性^[33];(g)不同转角下谷极化的门电压调控^[34]

Fig.4 Optical properties and tunability of Moiré excitons. (a) Band modulation in a Moiré superlattice and the formation of interlayer excitons^[32]. (b) Reflection spectra of WSe₂/WS₂ heterostructures at different twist angles, confirming the presence of Moiré exciton states (I ~ III)^[21]. (c) Modulation of the excitonic optical selection rules by the Moiré potential in a MoS₂/WSe₂ heterostructure^[22]. (d) Circularly polarized photoluminescence spectrum and degree of polarization variation of a 1°-twisted MoSe₂/WSe₂ heterobilayer under circularly polarized excitation^[13]. (e) Circularly polarized photoluminescence characteristics of interlayer valley excitons trapped in a Moiré potential in a 2°-twisted MoSe₂/WSe₂ heterobilayer^[17]. (f) Temperature-dependent optical properties of Moiré excitons trapped in different types of potential wells^[33]. (g) Gate voltage control of valley polarization at different twist angles^[34]

反向时,空穴掺杂诱导谷极化反转,圆偏振极化从+40%变为-30%,表明电场可重构激子的谷自由度^[34]。这种电控谷极化在转角 $\theta \approx 0^\circ$ 时尤为显著,因其莫尔势保持C3对称性,确保谷极化鲁棒性。

4 莫尔超晶格中的声子

莫尔超晶格通过周期势场调制二维材料的晶格动力学(图5(a)),将显著影响声子振动模式(如层间呼吸模与剪切模),从而实现声子能谱与电子-声子耦合强度的动态操控,为声子工程与量子材料设计提供新范式。

Lin等^[35]通过低频拉曼散射技术,报道了转角双层WSe₂中层间呼吸模与剪切模的转角依赖性(图5(b)、(c))。研究表明,在小角度扭曲的MoS₂双层中,莫尔超晶格的形成引发了局部原子结构的

重构,从而导致声子模式的重整化。Quan等^[36]研究表明,在 $0^\circ \sim 2^\circ$ 的扭转角范围内,低频层间声子模式(包括剪切模和呼吸模)发生剧烈演化,这种演化主要由原子重构导致的强耦合效应所驱动(图5(d))。

此外,莫尔超晶格引起非中心声子模式的布里渊区反折叠,产生“莫尔声子”^[37]。当拉曼激发能量匹配C激子共振条件时,莫尔声子信号增强~10倍(图5(e)),揭示其与电子激子态的强耦合。此外,莫尔声子能量与强度对 θ 的敏感性使其成为超晶格结构表征的有效探针。在WSe₂转角双层体系中,层间耦合导致了显著的声子杂化效应。Bera等^[38]的研究表明,当扭转角处于 $2^\circ \sim 3^\circ$ 之间时,A_{1g}和E_{2g}声子模式发生明显分裂,且该分裂的程度与莫尔势的强度直接相关(图5(f))。

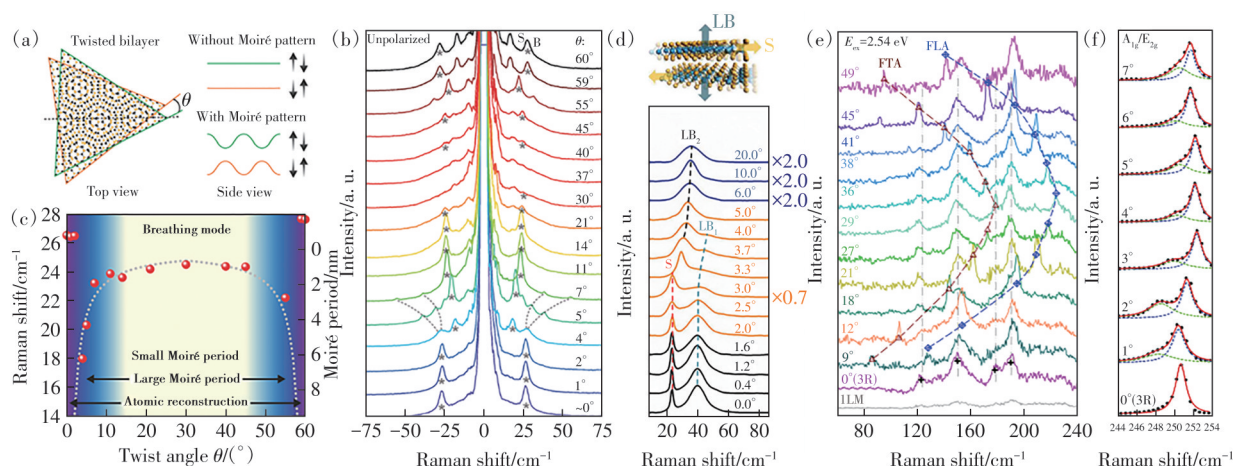


图5 莫尔超晶格中的声子。(a)~(c)超光谱拉曼成像对莫尔超晶格的空间映射^[35];(d)MoS₂莫尔超晶格中的声子重整化^[36];(e)转角MoS₂双层中的莫尔声子^[37];(f)转角WSe₂双层中的角度依赖声子杂化^[38]

Fig.5 Phonons in the Moiré superlattices. (a)–(c) Hyperspectral Raman imaging for spatial mapping of Moiré superlattices^[35]. (d) Phonon renormalization in reconstructed MoS₂ Moiré superlattices^[36]. (e) Moiré phonons in twisted bilayer MoS₂^[37]. (f) Twist-angle-dependent phonon hybridization in WSe₂/WSe₂ homobilayers^[38]

5 莫尔超晶格中的手性光学

莫尔超晶格通过对称性破缺与能带重构,诱导出独特的手性光学效应,其核心表现为圆二色性、手性等离子体模式。该效应在TBG、TMDs异质结及hBN等体系中展现出显著的材料普适性,为手性光子学器件设计提供了新平台。

TBG的手性光学效应源于层间耦合诱导的对称性破缺。Kim等^[18]研究表明,通过人为控制扭转角度,可以在TBG中引入强烈的手性光学效应(图6(a))。当TBG的扭转角度达到16.5°时,其光学吸收谱中出现了明显的圆二色性特征,即对左旋和右旋圆偏振光的吸收存在明显差异。实验表明,这种手性响应的强度可以通过调节扭转角

精确控制,并且当扭转角度达到24.5°时,其圆二色性信号强度达到最大,远超传统分子手性材料。

莫尔超晶格中的手性光学不仅存在于扭转双层石墨烯,在莫尔绝缘体中同样得到了实验验证。Ochoa等^[39]研究表明,在hBN等具有亚晶格不对称性的二维材料中,扭曲双层结构可自然形成平带。这些平带之间的电子跃迁导致了明显的手性光学响应,表现为对圆偏振光的吸收率不同(图6(b))。

等离子体模式是二维电子系统中的集体激发模式,其色散关系和传播特性高度依赖于材料的能带结构。Huang等^[19]研究表明,在TBG中,手性等离子体模式因其Berry曲率的非平衡分布而表现出非互易传播特性(图6(c))。在实验中,研究

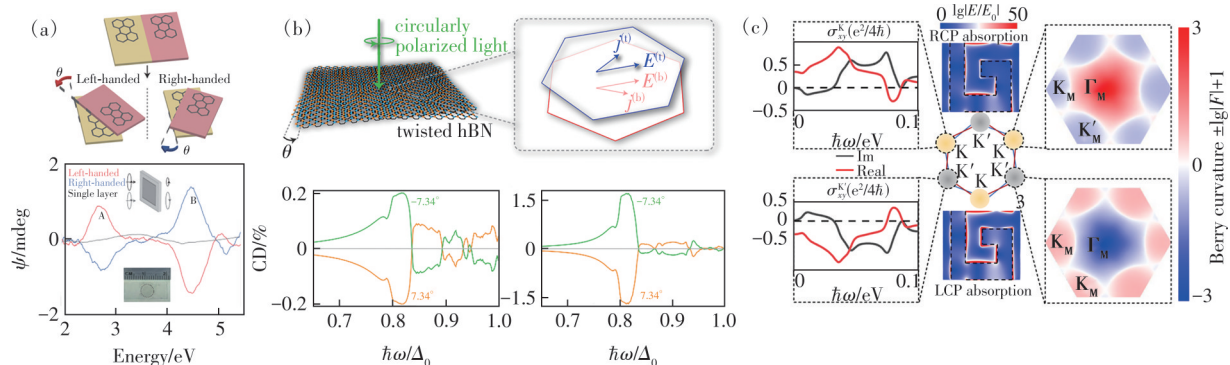


图6 莫尔超晶格中的手性光学。(a)手性转角双层石墨烯的结构及其圆偏振光吸收特性^[18];(b)莫尔超晶格绝缘体的结构与手性光学响应^[39];(c)扭转双层石墨烯中的手性等离子体模式^[19]

Fig.6 Chiral optical properties in the Moiré superlattices. (a) Structure of chiral twisted bilayer graphene and its circularly polarized light absorption characteristics^[18]. (b) Structure and chiral optical response of Moiré superlattice insulators^[39]. (c) Chiral plasmonic modes in twisted bilayer graphene^[19]

人员利用螺旋结构的纳米带来激发 TBG 中的手性等离子体模式,并通过傅里叶变换红外光谱测量了其光学响应。

6 莫尔超晶格中的磁光效应

近年来,二维磁性材料(如 CrI_3 和 CrBr_3)的莫

尔超晶格因其独特的磁光效应成为研究热点^[40-43]。研究者利用磁光拉曼光谱直接观测到单层 CrI_3 中的二维自旋波(如图 7(a)),首次揭示了磁振子的选择定则和对称性依赖,并提取了相关的磁各向异性和层间/层内交换常数,为二维磁性材料中磁振子物理的研究和器件应用奠定了基础^[44]。

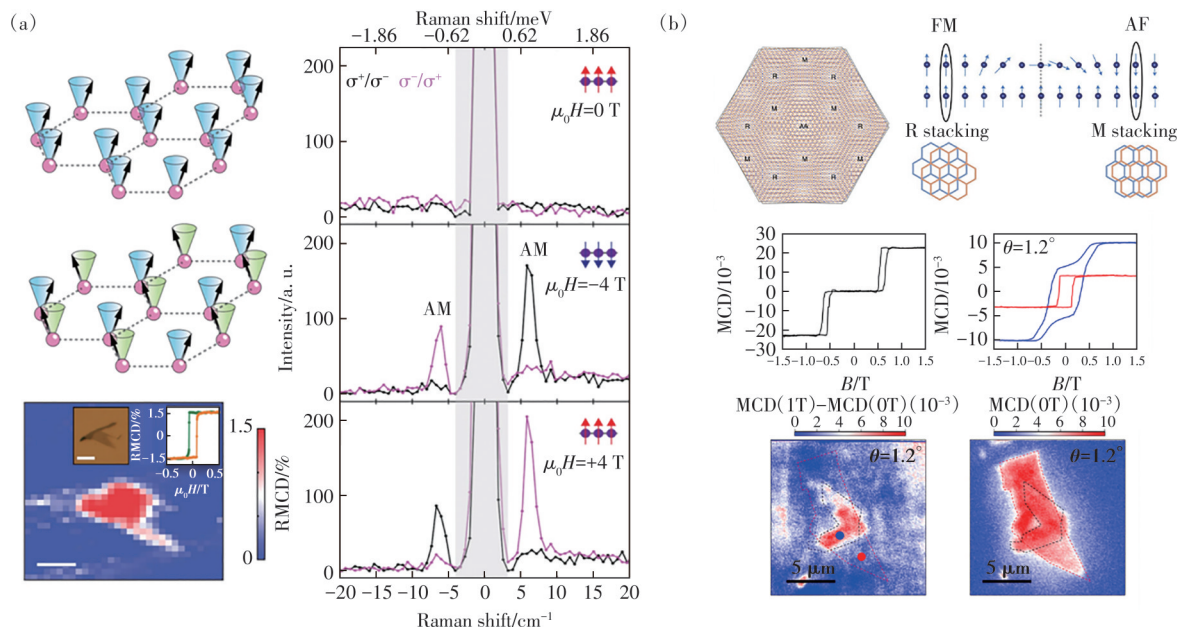


图 7 莫尔体系中的磁光效应。(a)单层 CrI_3 的铁磁自旋波模式、零场磁圆二色性表征以及不同磁场 (± 4 T) 下的低频拉曼光谱^[44]; (b)不同扭转角下双层 CrI_3 的磁圆二色性(MCD)响应及其显微图像^[45]

Fig.7 Magneto-optical effects in Moiré systems. (a) Ferromagnetic spin wave modes, zero-field magnetic circular dichroism characterization, and low-frequency Raman spectra under different magnetic fields (± 4 T) of monolayer CrI_3 ^[44]. (b) Magnetic circular dichroism responses and corresponding microscopy images of twisted bilayer CrI_3 at different twist angles^[45]

通过调控层间扭转角或施加应变,莫尔超晶格中形成空间调制的堆叠结构,诱导铁磁(FM)与反铁磁(AFM)相互竞争的磁序共存态。如图 7(b),Xu 等^[45]利用磁圆二色性成像直接观测到小扭转角($\theta < 3^\circ$) CrI_3 双层中 FM 与 AFM 区域的周期性分布,其零场剩余磁化与自旋翻转临界场的反常温度依赖关系揭示了莫尔界面处非共线自旋织构的存在。这些发现不仅为理解莫尔磁性中的磁光耦合机制提供了新视角,也为设计高密度可编程磁存储器件和太赫兹自旋电子学器件奠定了理论基础。

7 莫尔超晶格的先进表征手段

莫尔超晶格在调控电子、激子及声子行为方面展现出独特潜力,但其多尺度空间异质性(如扭转角涨落、原子重构及局域无序)对物性解析提出了严峻挑战。为建立结构-物性关联,近年来高精度、多尺度表征技术协同发展,从宏观对称性探测

(二次谐波生成,SHG)、纳米光学成像(扫描近场光学显微镜,SNOM),到原子级电子-声子耦合分析(扫描隧道显微/谱,STM/STS;针尖增强拉曼光谱,TERS),形成了覆盖微米至埃级分辨率的全息表征体系。

SHG 作为非侵入式光学手段,通过探测晶体对称性破缺实现对莫尔超晶格扭转角的精准标定。以 WSe_2 双层体系为例,Lin 等^[20]发现高能激子对扭转角的灵敏度是低能 A 激子的十倍以上,当 $\theta \approx 3^\circ$ 时 SHG 信号因电磁感应透明效应被选择性抑制,而在 $\theta \approx 16^\circ$ 时信号增强至初始值的 15 倍(图 8(a))。这种非线性调控源于层间耦合对跃迁选择规则的修正——当扭转角诱导的晶格失配打破空间反演对称性时,特定偏振光与激子态的共振增强显著改变 SHG 响应。类似效应在石墨烯体系中更为显著,Ha 等^[46]在魔角转角双层石墨烯($\theta \approx 1.1^\circ$)中观测到三次谐波(THG)信号强度达单层石墨烯的 60 倍,其根源在于范霍夫奇点处电子

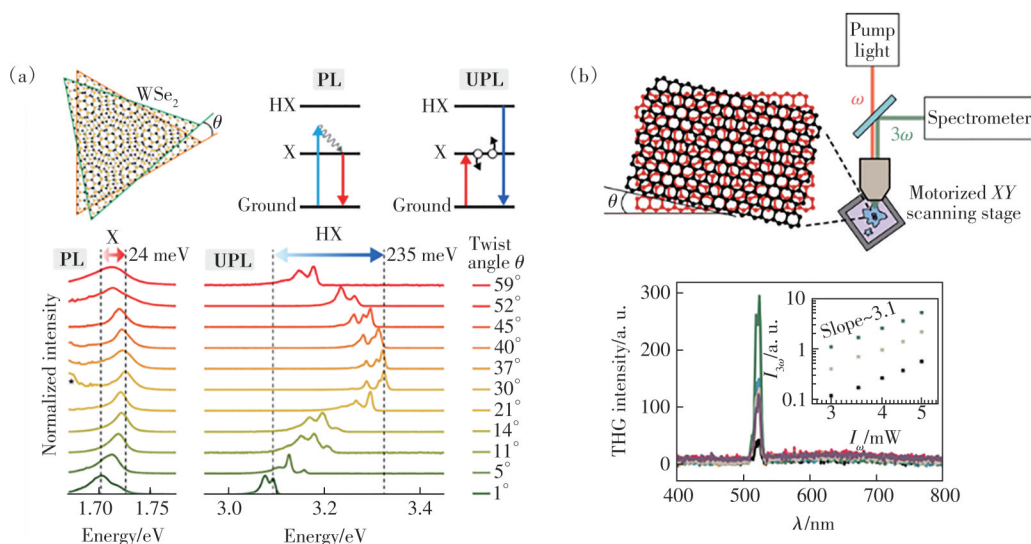


图 8 莫尔超晶格中的非线性光学响应。(a)通过扭转角调控光学非线性^[20];(b)转角双层石墨烯中的三次谐波增强效应^[46]

Fig.8 Nonlinear optical response in the Moiré superlattices. (a)Optical nonlinearity controlled by twist angle^[20]. (b)Enhanced third-harmonic generation in twisted bilayer graphene^[46]

态密度的剧增(图 8(b))。当三倍基频光子能量与 VHS 能量匹配时,电子跃迁概率呈指数增长,

为非线性光学器件的能带工程设计提供了范例。

ARPES 通过直接测量电子能带结构(图 9(a)),

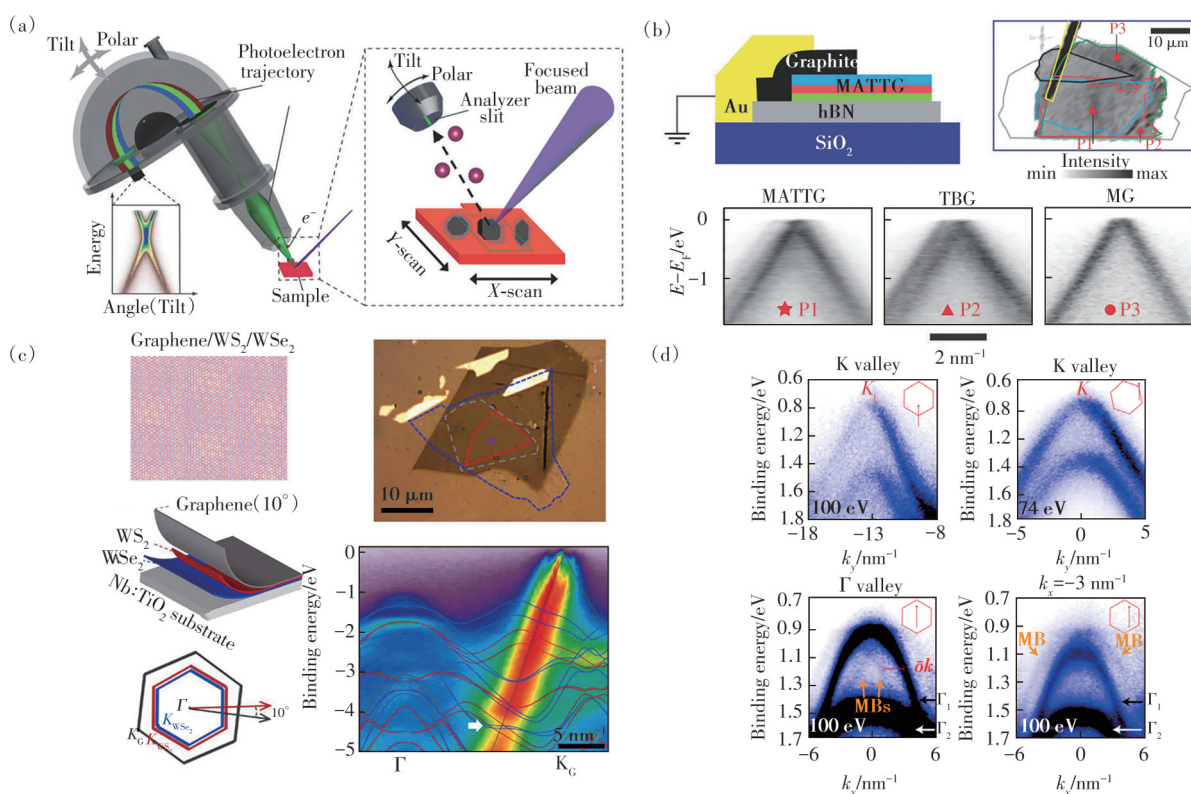


图 9 角分辨光电子能谱(ARPES)在莫尔超晶格中的应用。(a)ARPES 研究莫尔超晶格示意图^[47];(b)魔角扭曲三层石墨烯中狄拉克带与莫尔平带共存^[48];(c)双层与三层莫尔超晶格中的强层间相互作用^[49];(d)转角 WSe₂体系中,Γ-谷的莫尔带结构及其导致的新型六角晶格电子态^[50]

Fig.9 Applications of angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) in the Moiré superlattices. (a)Schematic illustration of ARPES studies on Moiré superlattices^[47]. (b)Coexistence of Dirac bands and Moiré flat bands in magic-angle twisted trilayer graphene^[48]. (c)Strong interlayer interactions in bilayer and trilayer Moiré superlattices^[49]. (d)Γ-valley Moiré bands and emergent hexagonal lattice in twisted WSe₂ systems^[50]

为莫尔平带与强关联态研究提供了关键证据^[47]。MATBG 中(图 9(b)), ARPES 揭示了平带(带宽 < 20 meV)与狄拉克锥的耦合机制^[48]。当 $\theta \approx 1.1^\circ$ 时, 平带电子填充率的调控可诱导超导与关联绝缘态相变, 而 Dirac 锥的扭曲证实了莫尔势对原始能带的拓扑修饰。在 TMDs 异质结(如 WS_2/WSe_2) 中, ARPES 进一步揭示了 Γ 点与 K 点的能带演化差异(图 9(c))—— Γ 点的莫尔能带分裂达 220 meV(K 点仅 15 meV), 表明层间杂化在布里渊区中心更为显著^[49]。这种空间选择性耦合为设计谷依赖的激子器件提供了新思路。例如, 在 $\theta \approx 5.1^\circ$ 的 WSe_2 双层(图 9(d)) 中, Γ 点能带折叠形成的类 Kagome 电子分布与 STM 拓扑成像高度吻合, 证实了莫尔周期势对电子局域化的调控能力^[50]。

SNOM 通过金属探针的局域场增强效应, 实现了激子与光电流的纳米级空间分辨。在最小转角石墨烯(mTBG, $\theta \approx 0.1^\circ$) 中, Hesp 团队^[51] 利用光电流显微技术发现单个莫尔超晶胞(~ 50 nm) 内光响应呈现周期性振荡, 其幅值与符号受局部堆垛构型(AB/BA 域) 的严格调控(图 10(a)、(b))。类似地, $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ 异质结^[52] 的 SNOM 成像揭示了激子共振能量的空间调制规律: 莫尔势阱区域(势深 ~ 150 meV) 的激子发光强度比势垒区高 3 倍, 且线宽缩窄至 ~ 200 μeV , 证实了激子局域化效应(图 10(c)~(g))。此外, nano-IR 技术通过对 hBN 莫尔超晶格的声子成像(图 10(h)、(i))^[53], 发现三角形畴(边长 ~ 10 nm) 与畴壁区域的声子频率差异达 4 cm^{-1} , 为声子工程调控提供了新维度。

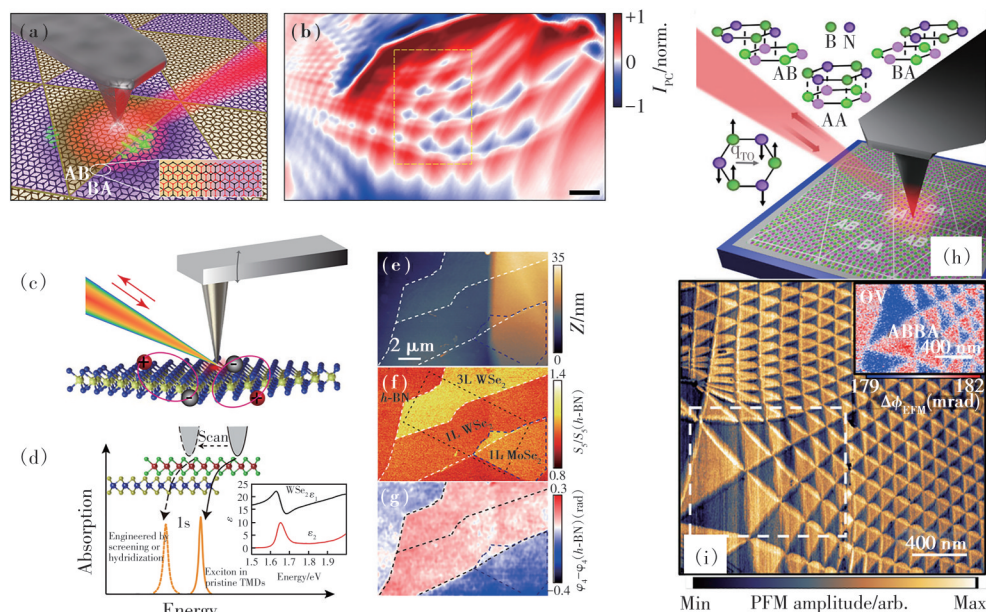


图 10 纳米尺度近场光学成像在莫尔超晶格中的应用。(a)~(b) 纳米光电流扫描显微技术研究最小转角双层石墨烯的光响应特性^[51]; (c)~(g) 散射型扫描近场光学显微镜研究 $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ 异质双层中的局域光学性质^[52]; (h)~(i) 纳米级红外光谱技术探测六方氮化硼(hBN)莫尔超晶格的纳米级晶格动力学^[53]

Fig.10 Applications of nanoscale near-field optical imaging in the Moiré superlattices. (a)~(b) s-SNOM photocurrent microscopy for studying the photoresponse in minimally twisted bilayer graphene^[51]. (c)~(g) s-SNOM investigation of the local optical properties in $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ heterobilayers^[52]. (h)~(i) Nano-IR for probing nanoscale lattice dynamics in hexagonal boron nitride (hBN) Moiré superlattices^[53]

TERS 结合扫描探针的原子级空间分辨与拉曼光谱的指纹识别能力, 可解析莫尔超晶格的局域晶格动力学。在 $\theta \approx 0.5^\circ$ 的转角双层石墨烯中, TERS 成像显示 G' 模(~ 2600 cm^{-1}) 在 AA 堆垛区域的强度比 AB/BA 域高 5 倍, 而 G 模(~ 1584 cm^{-1}) 则呈现相反趋势^[54]。这种声子局域化源于 AA 区域更强的电子-声子耦合及声子态密度重构(图

11(a)~(d))。对于 TMDs 体系(如 $\theta \approx 3^\circ$ 的 MoSe_2 双层), TERS 进一步揭示了莫尔势诱导的应变梯度及其对激子-声子相互作用的调制^[55]; 局域拉曼峰位偏移与激子发光能量的空间相关性证实了晶格畸变与光学响应的强关联。这些原子尺度洞察为理解莫尔超晶格的量子限域效应与器件性能优化提供了直接实验依据。

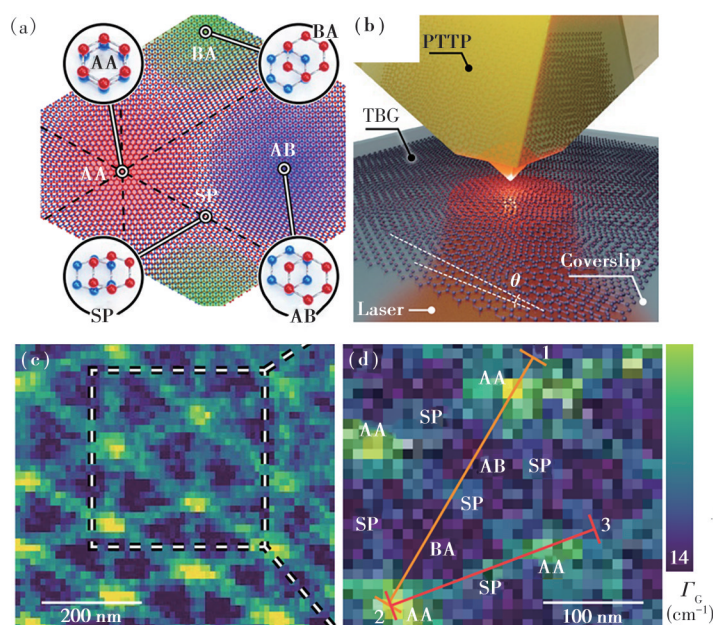


图 11 针尖增强拉曼光谱在莫尔超晶格中的应用。(a)~(d)低角度扭转双层石墨烯中的晶格重构与声子局域化^[54]

Fig.11 Applications of nano-Raman spectroscopy in the Moiré superlattices. (a)~(d) Lattice reconstruction and phonon localization in low-angle twisted bilayer graphene^[54]

8 莫尔超晶格的光学器件应用

莫尔超晶格通过精准调控电子能带、激子局域化及光子-物质相互作用,从宽谱光电探测到量子光源与低阈值激光,其独特的周期性势场与强关联效应正推动光子技术向高性能、可编程与量子化方向前进。

转角二维材料的光电响应特性与其能带结构的莫尔调制密切相关。以TBG为例,范霍夫奇点的局域电子态密度增强效应可显著提升光生载流子效率。Yin等^[23]研究表明,当光子能量匹配范霍夫奇点间能隙(如 $\theta \approx 12^\circ$ 时 $\Delta E \approx 0.8$ eV),TBG的光电流强度可达单层石墨烯的80倍(图12(a)),且在可见至近红外波段(400~1 600 nm)展现出连续

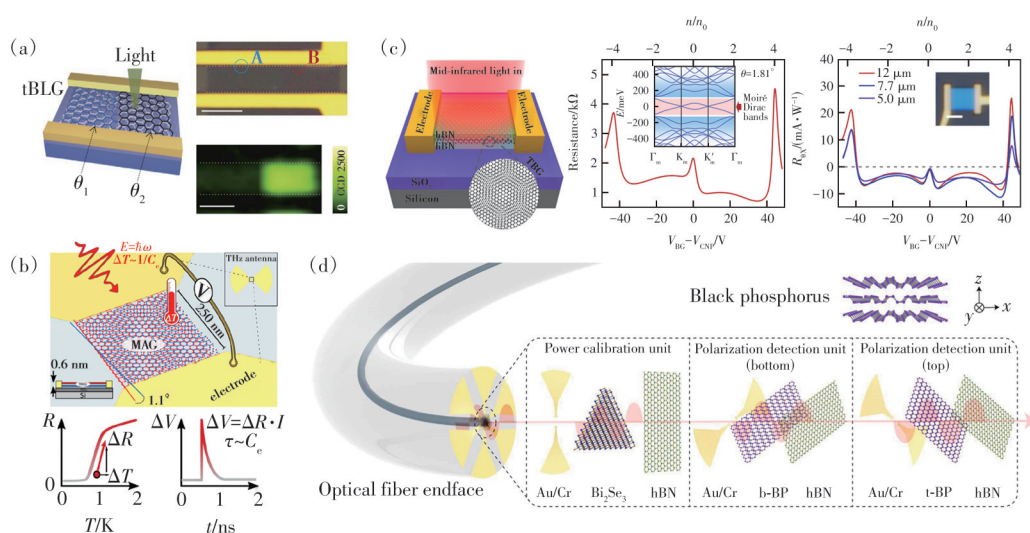


图 12 莫尔超晶格的光电探测应用。(a)转角双层石墨烯中范霍夫奇点诱导的选择性增强光电流^[23];(b)魔角双层石墨烯纳米量热探测器用于宽带单光子探测^[56];(c)小扭转角双层石墨烯在中红外波段的强光电响应^[24];(d)基于转角黑磷结构的光纤集成偏振仪^[57]

Fig.12 Photodetection applications in the Moiré superlattices. (a) Selectively enhanced photocurrent generation in twisted bilayer graphene induced by Van Hove singularity^[23]. (b) Magic-angle bilayer graphene nanocalorimeter for broadband single-photon detection^[56]. (c) Strong mid-infrared photoresponse in small-TBG^[24]. (d) Fiber-integrated polarimeter based on twisted black phosphorus (BP) van der Waals heterostructures^[57]

可调的光谱响应。这种特性为可重构光电探测器提供了新范式——通过静电门压调控费米能级位置,可实现器件响应波长与灵敏度的动态适配。Seifert 团队^[56]开发的纳米量热探测器利用其超低电子热容($\sim 10^{-22}$ J/K)与超导相变边缘效应,可在室温下实现单光子水平的太赫兹波探测(响应时间 4 ns),其能量分辨率达 0.01 eV,为量子传感与深空通信开辟了新路径(图 12(b))。在中红外领域,小角度 TBG($\theta \approx 1.81^\circ$)通过莫尔超晶格能隙(~ 150 meV)的形成,在 5~12 μm 波段展现出 26 mA/W 的外响应度,其性能超越传统锗基探测器两个数量级(图 12(c))^[24]。最近, Xiong 等^[57]设计的转角黑磷偏振仪通过双层堆叠($\theta \approx 30^\circ$)实现了自驱动偏振分辨功能(图 12(d))。其原理在于不同堆叠构型对线偏振与圆偏振光的吸收各向异

性差异,结合光纤集成技术,该器件无需机械旋转部件即可实时解析入射光偏振态,在偏振编码通信与生物传感领域具有重要应用价值。

莫尔势对激子的局域化效应为量子光学器件提供了理想的单光子发射源。在 $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ 异质双层中(图 13(a)~(c)), Baek 团队^[58]通过 $\theta \approx 0.5^\circ$ 的莫尔势阱实现了激子的强空间限域(势深 ~ 250 meV),其光子反聚束实验($g^2(0)=0.15$)证实了单光子发射特性。垂直电场可调节层间激子的永久偶极矩使发射能量在 1.3~1.6 eV 范围内连续调谐,且不同势阱的激子可通过电场同步至相同共振模式,为可扩展量子网络中的频率一致性难题提供了解决方案。进一步结合纳米腔 Purcell 效应,单光子发射率可提升 10^6 counts/s,亮度较传统量子点体系提高两个数量级。

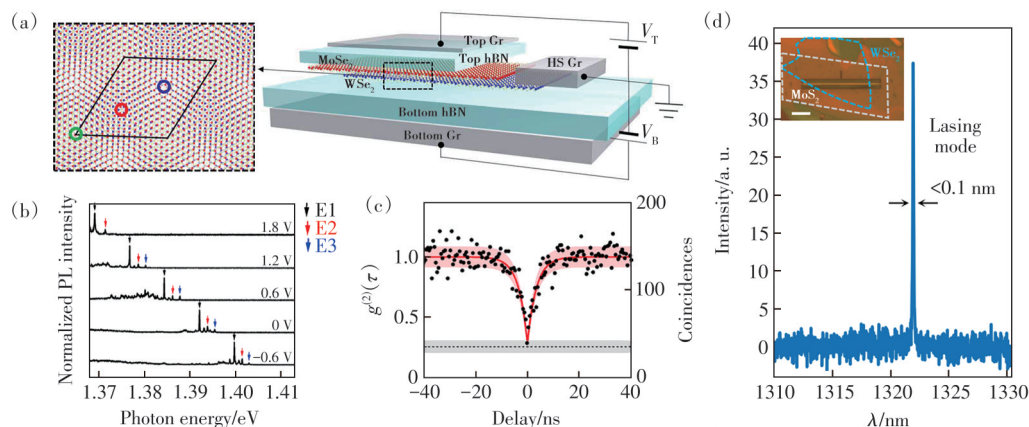


图 13 莫尔超晶格的量子光学特性及激光应用。(a)~(c)基于莫尔超晶格俘获激子的高度可调谐量子光源^[58];(d)基于莫尔层间激子的室温激光现象^[59]

Fig.13 Quantum optical properties and laser applications in the Moiré superlattices. (a) – (c) Highly tunable quantum light sources based on Moiré-trapped excitons in Moiré superlattices^[58]. (d) Room-temperature laser emission based on Moiré interlayer excitons^[59]

在激光技术领域,莫尔激子的长寿命特性^[17, 33-34]与高密度态分布为低阈值激光提供了新途径。Lin 等^[59]将 $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ 异质结($\theta \approx 3^\circ$)与硅基光子晶体腔耦合,在电信 O 波段(1 280 nm)实现了室温连续激光输出(图 13(d))。莫尔势诱导的激子积累效应使光学增益提升至 800 cm^{-1} ,激光阈值降至 $0.8\text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$,仅为传统 TMDs 激光器的 1/5。同时,激子-光子强耦合形成的极化激元使激光线宽缩窄至 0.1 nm(对应相干时间 45 ps),为高速光互连与相干光子计算提供了关键器件支持。值得关注的是,莫尔激光器的波长可通过扭转角($\Delta\lambda \approx 2\text{ nm}/(^\circ)$)与电场($\Delta\lambda \approx 0.5\text{ nm}/\text{V}$)双重调控,这种多维可编程特性使其在可重构光子芯

片与波长分集复用系统中具有独特优势。

9 结论与展望

莫尔超晶格通过扭转角度的精准调控为二维范德瓦尔斯材料赋予了超越单层体系的新奇物性,推动了转角光子学与光电子学的范式革新。从魔角石墨烯的强关联电子态到 TMDs 异质结的量子化激子,从手性光学效应到非线性光场调控,莫尔超晶格不仅深化了对低维量子体系的基础认知,更为高性能光电器件与量子技术提供了全新设计维度。然而,莫尔体系在从基础研究迈向实用器件过程中仍面临诸多挑战,包括可控合成、尺度放大、界面清洁性、能带工程与器件稳定性等方

面。首先,在制备层面,当前机械转移法虽能实现亚 1° 级别的精确叠层,但受限于样品尺寸小、工艺复杂性高与界面洁净度差。CVD直接生长具有特定扭转角的TMDs异质结尚无成熟报道,其挑战在于实现异质材料的分步骤投料控制与同步成核条件调配,此外还需克服异质界面的晶格失配和热力学非兼容性。未来可通过发展多源协同控制的CVD系统,引入界面选择性生长机制,或结合机器学习预测晶粒对齐概率等方法,在大面积、可重复制备上取得突破。其次,在物性机制层面,尽管实验中已观测到激子能带分裂、平带诱导态及手性光学效应等新奇现象,但其微观起源仍不完全清晰。例如,平带是否为超导性的决定因子仍具争议,激子与声子、电子间的强耦合机制仍需精确建模。为此,未来需发展高时空分辨、多物理场耦合的原位表征手段,如结合时间分辨ARPES、TERS及近场光谱技术,捕捉激子/声子在

皮秒-纳米尺度下的动态演化过程。应用前景方面,莫尔超晶格基础物理研究所揭示的激子调控、谷态与自旋-轨道耦合机制、平带增强的非线性响应以及可编程莫尔势场,为频率选择性光电器件、室温谷电子学、低阈值量子光源及片上量子计算平台等实际应用提供了关键材料支撑与设计灵感。

综上所述,莫尔超晶格正由“物理现象发现”阶段向“功能器件探索”阶段加速演进。我们相信,随着可控合成、先进表征与应用导向设计手段的融合突破,莫尔超晶格将在光电子器件、量子信息处理及拓扑光学等领域展现更广阔的应用图景,并成为下一代量子材料与器件的重要基础平台。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250068>

参 考 文 献:

- [1] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [2] CASTRO NETO A H, GUINEA F, PERES N M R, *et al.* The electronic properties of graphene [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2009, 81(1): 109-162.
- [3] GEIM A K, NOVOSELOV K S. The rise of graphene [J]. *Nat. Mater.*, 2007, 6(3): 183-191.
- [4] SARMA SDAS, ADAM S, HWANG E H, *et al.* Electronic transport in two-dimensional graphene [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2011, 83(2): 407-470.
- [5] XIAO D, LIU G B, FENG W X, *et al.* Coupled spin and valley physics in monolayers of MoS₂ and other group-VI dichalcogenides [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108(19): 196802.
- [6] ZENG H L, DAI J F, YAO W, *et al.* Valley polarization in MoS₂ monolayers by optical pumping [J]. *Nat. Nanotech.*, 2012, 7(8): 490-493.
- [7] DEAN C R, YOUNG A F, MERIC I, *et al.* Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics [J]. *Nat. Nanotech.*, 2010, 5(10): 722-726.
- [8] WATANABE K, TANIGUCHI T, KANDA H. Direct-bandgap properties and evidence for ultraviolet lasing of hexagonal boron nitride single crystal [J]. *Nat. Mater.*, 2004, 3(6): 404-409.
- [9] NICOLOSI V, CHHOWALLA M, KANATZIDIS M G, *et al.* Liquid exfoliation of layered materials [J]. *Science*, 2013, 340(6139): 1226-1229.
- [10] CALDWELL J D, AHARONOVICH I, CASSABOIS G, *et al.* Photonics with hexagonal boron nitride [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2019, 4(8): 552-567.
- [11] CAO Y, FATEMI V, DEMIR A, *et al.* Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices [J]. *Nature*, 2018, 556(7699): 80-84.
- [12] CAO Y, FATEMI V, FANG S A, *et al.* Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices [J]. *Nature*, 2018, 556(7699): 43-50.
- [13] TRAN K, MOODY G, WU F C, *et al.* Evidence for Moiré excitons in van der Waals heterostructures [J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 71-75.
- [14] URI A, GROVER S, CAO Y, *et al.* Mapping the twist-angle disorder and Landau levels in magic-angle graphene [J].

- Nature*, 2020, 581(7806): 47-52.
- [15] RIVERA P, SCHAIBLEY J R, JONES A M, *et al.* Observation of long-lived interlayer excitons in monolayer MoSe₂-WSe₂ heterostructures [J]. *Nat. Commun.*, 2015, 6(1): 6242.
- [16] JIN C H, REGAN E C, YAN A M, *et al.* Observation of Moiré excitons in WSe₂/WS₂ heterostructure superlattices [J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 76-80.
- [17] SEYLER K L, RIVERA P, YU H Y, *et al.* Signatures of Moiré-trapped valley excitons in MoSe₂/WSe₂ heterobilayers [J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 66-70.
- [18] KIM C J, SÁNCHEZ-CASTILLO A, ZIEGLER Z, *et al.* Chiral atomically thin films [J]. *Nat. Nanotech.*, 2016, 11(6): 520-524.
- [19] HUANG T Y, TU X C, SHEN C Q, *et al.* Observation of chiral and slow plasmons in twisted bilayer graphene [J]. *Nature*, 2022, 605(7908): 63-68.
- [20] LIN K Q, FARIA JUNIOR P E, BAUER J M, *et al.* Twist-angle engineering of excitonic quantum interference and optical nonlinearities in stacked 2D semiconductors [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 1553.
- [21] ALEXEEV E M, RUIZ-TIJERINA D A, DANOVIH M, *et al.* Resonantly hybridized excitons in Moiré superlattices in van der Waals heterostructures [J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 81-86.
- [22] YU H Y, LIU G B, TANG J J, *et al.* Moiré excitons: from programmable quantum emitter arrays to spin-orbit-coupled artificial lattices [J]. *Sci. Adv.*, 2017, 3(11): e1701696.
- [23] YIN J B, WANG H, PENG H, *et al.* Selectively enhanced photocurrent generation in twisted bilayer graphene with van Hove singularity [J]. *Nat. Commun.*, 2016, 7(1): 10699.
- [24] DENG B C, MA C, WANG Q Y, *et al.* Strong mid-infrared photoresponse in small-twist-angle bilayer graphene [J]. *Nat. Photonics*, 2020, 14(9): 549-553.
- [25] KIM K, DASILVA A, HUANG S Q, *et al.* Tunable Moiré bands and strong correlations in small-twist-angle bilayer graphene [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2017, 114(13): 3364-3369.
- [26] LIAO M Z, WEI Z, DU L J, *et al.* Precise control of the interlayer twist angle in large scale MoS₂ homostructures [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 2153.
- [27] LIU C, LI Z H, QIAO R X, *et al.* Designed growth of large bilayer graphene with arbitrary twist angles [J]. *Nat. Mater.*, 2022, 21(11): 1263-1268.
- [28] XU M Z, JI H J, ZHENG L, *et al.* Reconfiguring nucleation for CVD growth of twisted bilayer MoS₂ with a wide range of twist angles [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 562.
- [29] ZHOU J, HUANG H J, ZHAO Z H, *et al.* Homo-site nucleation growth of twisted bilayer MoS₂ with commensurate angles [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(38): 2408227.
- [30] RIBEIRO-PALAU R, ZHANG C J, WATANABE K, *et al.* Twistable electronics with dynamically rotatable heterostructures [J]. *Science*, 2018, 361(6403): 690-693.
- [31] TANG H N, WANG Y T, NI X Q, *et al.* On-chip multi-degree-of-freedom control of two-dimensional materials [J]. *Nature*, 2024, 632(8027): 1038-1044.
- [32] REGAN E C, WANG D Q, PAIK E Y, *et al.* Emerging exciton physics in transition metal dichalcogenide heterobilayers [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2022, 7(10): 778-795.
- [33] FANG H L, LIN Q L, ZHANG Y, *et al.* Localization and interaction of interlayer excitons in MoSe₂/WSe₂ heterobilayers [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 6910.
- [34] DAI D J, FU B W, YANG J N, *et al.* Twist angle-dependent valley polarization switching in heterostructures [J]. *Sci. Adv.*, 2024, 10(20): eado1281.
- [35] LIN K Q, HOLLER J, BAUER J M, *et al.* Large-scale mapping of Moiré superlattices by hyperspectral Raman imaging [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(34): 2008333.
- [36] QUAN J M, LINHART L, LIN M L, *et al.* Phonon renormalization in reconstructed MoS₂ Moiré superlattices [J]. *Nat. Mater.*, 2021, 20(8): 1100-1105.
- [37] LIN M L, TAN Q H, WU J B, *et al.* Moiré phonons in twisted bilayer MoS₂ [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(8): 8770-8780.
- [38] BERA K P, SOLANKI D, MANDAL S, *et al.* Twist angle-dependent phonon hybridization in WSe₂/WSe₂ homobilayer [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(35): 24379-24390.

- [39] OCHOA H, ASENJO-GARCIA A. Flat bands and chiral optical response of Moiré insulators [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2020, 125(3): 037402.
- [40] JANG M, LEE S, CANTOS-PRIETO F, *et al.* Direct observation of twisted stacking domains in the van der Waals magnet CrI₃ [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 5925.
- [41] YANG B W, PATEL T, CHENG M X, *et al.* Macroscopic tunneling probe of Moiré spin textures in twisted CrI₃ [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 4982.
- [42] LI S L, SUN Z L, MCLAUGHLIN N J, *et al.* Observation of stacking engineered magnetic phase transitions within Moiré supercells of twisted van der Waals magnets [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 5712.
- [43] YAO F R, ROSSI D, GABROVSKI I A, *et al.* Moiré magnetism in CrBr₃ multilayers emerging from differential strain [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 10377.
- [44] CENKER J, HUANG B, SURIN, *et al.* Direct observation of two-dimensional magnons in atomically thin CrI₃ [J]. *Nat. Phys.*, 2021, 17(1): 20-25.
- [45] XU Y, RAY A, SHAO Y T, *et al.* Coexisting ferromagnetic-antiferromagnetic state in twisted bilayer CrI₃ [J]. *Nat. Nanotech.*, 2022, 17(2): 143-147.
- [46] HA S, PARK N H, KIM H, *et al.* Enhanced third-harmonic generation by manipulating the twist angle of bilayer graphene [J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 19.
- [47] LI Y W, WAN Q, XU N. Recent advances in Moiré superlattice systems by angle-resolved photoemission spectroscopy [J]. *Adv. Mater.*, 2023, DOI: 10.1002/adma.202305175.
- [48] LI Y W, ZHANG S H, CHEN F Q, *et al.* Observation of coexisting dirac bands and Moiré flat bands in magic-angle twisted trilayer graphene [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(42): 2205996.
- [49] XIE S E, FAETH B D, TANG Y H, *et al.* Strong interlayer interactions in bilayer and trilayer Moiré superlattices [J]. *Sci. Adv.*, 2022, 8(12): eabk1911.
- [50] PEI D, WANG B B, ZHOU Z S, *et al.* Observation of Γ -valley Moiré bands and emergent hexagonal lattice in twisted transition metal dichalcogenides [J]. *Phys. Rev. X*, 2022, 12(2): 021065.
- [51] HESP N C H, TORRE I, BARCONS-RUIZ D, *et al.* Nano-imaging photoresponse in a Moiré unit cell of minimally twisted bilayer graphene [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 1640.
- [52] ZHANG S, LI B C, CHEN X Z, *et al.* Nano-spectroscopy of excitons in atomically thin transition metal dichalcogenides [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 542.
- [53] MOORE S L, CICCARINO C J, HALBERTAL D, *et al.* Nanoscale lattice dynamics in hexagonal boron nitride Moiré superlattices [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 5741.
- [54] GADELHA A C, OHLBERG D A A, RABELO C, *et al.* Localization of lattice dynamics in low-angle twisted bilayer graphene [J]. *Nature*, 2021, 590(7846): 405-409.
- [55] JORIO A, NADAS R, PEREIRA A G, *et al.* Nano-Raman spectroscopy of 2D materials [J]. *2D Mater.*, 2024, 11(3): 033003.
- [56] SEIFERT P, LU X B, STEPANOV P, *et al.* Magic-angle bilayer graphene nanocalorimeters: toward broadband, energy-resolving single photon detection [J]. *Nano Lett.*, 2020, 20(5): 3459-3464.
- [57] XIONG Y F, WANG Y S, ZHU R Z, *et al.* Twisted black phosphorus-based van der Waals stacks for fiber-integrated polarimeters [J]. *Sci. Adv.*, 2022, 8(18): eabo0375.
- [58] BAEK H, BROTONS-GISBERT M, KOONG Z X, *et al.* Highly energy-tunable quantum light from Moiré-trapped excitons [J]. *Sci. Adv.*, 2020, 6(37): eaba8526.
- [59] LIN Q L, FANG H L, KALABOUKHOV A, *et al.* Moiré-engineered light-matter interactions in MoS₂/WSe₂ heterobilayers at room temperature [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 8762.



陈果阳(1998-),男,云南文山山人,硕士研究生,2021年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事二维半导体拉曼光谱的研究。

E-mail: chenguoyang21@mails.ucas.ac.cn



闫家旭(1985-),男,河南驻马店人,博士,研究员,博士生导师,2014年于新加坡南洋理工大学获得博士学位,主要从事超高精度半导体光电材料表征及器件制备方面的研究。

E-mail: yanjiaxu@ciomp.ac.cn